

Metodología para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos, inducidos por terremotos para Cuba suroriental

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 14-23
2021
ISSN: 1131-9100

Methodology to evaluate the susceptibility to landslides and liquefaction of soils, induced by earthquakes for southeast Cuba

Sandra Y. Rosabal Domínguez¹, Alina Rodríguez Infante², José A. Zapata Balanqué³

Resumen

La región de Cuba suroriental es considerada como la zona de mayor peligro sísmico del país, debido a su cercanía a la zona de falla Bartlett-Caimán, por consiguiente una actividad sísmica de moderada a alta intensidad puede inducir peligros geológicos en esta región e impactar en el medio ambiente. El objetivo principal es proponer una metodología que permita evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos inducidos por terremotos para Cuba suroriental a través de la caracterización geológica, identificación de factores antropizados, caracterización morfotectónica y evaluación sismológicas. Se obtienen como resultados nuevos mapas de susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por terremotos; así como la comprobación directa en el terreno de los deslizamientos; se identifican las fallas principales que cortan el área de estudio, y se establecen y caracterizan los bloques morfotectónicos y el movimiento relativo entre ellos.

Abstract

The southeastern part of Cuba is considered to be the area of greatest seismic hazard in the country, due to its proximity to the Bartlett-Cayman fault zone, therefore a moderate to high intensity seismic activity can induce geological hazards in this region and impact the environment. The main objective is to propose a methodology that allows to evaluate the susceptibility to landslides and the liquefaction of soils induced by earthquakes for southeast Cuba through the geological characterization, identification of anthropized factors; morphotectonic characterization and seismological evaluation.

New maps of landslide susceptibility and liquefaction induced by earthquakes are obtained as results; as well as the direct verification in the terrain of landslides; the main faults that cut the study area are identified; and the morphotectonic blocks and the relative movement between them are established and characterized.

Palabras clave: deslizamientos, licuefacción de suelos, bloques morfotectónicos, metodología, peligros geológicos, medio ambiente.

Keywords: landslides, soil liquefaction, morphotectonic blocks, methodology, geological hazards, environment.

¹Investigador Auxiliar.

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

sandra@cenais.cu

²Investigador Titular.

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM)

alinarodriguezinfante@gmail.com

³Investigador Titular.

Delegación Provincial del CITMA, en Santiago de Cuba (CITMA)

zapata@citmasc.ciges.inf.cu

Recepción 13/01/2021

Aprobación 23/04/2021

1. INTRODUCCIÓN

La región de Cuba suroriental, es considerada la zona de mayor peligrosidad sísmica de Cuba, debido a la cercanía a la zona de contacto entre las placas de Norteamérica y el Caribe, contacto conocido como zona de falla Bartlett-Caimán, por consiguiente las máximas intensidades sísmica se esperan en este territorio, donde pueden ocurrir peligros geológicos inducidos como los deslizamientos y la licuefacción de suelos.

Cuba suroriental se ubica al sur del extremo este de Cuba, entre los 74,133° y 77,752° de longitud oeste y los 19,831° a 20,317° de latitud norte (figura 1). Abarca parte de la zona emergida de Cuba Oriental y cubre un área aproximada de 11 632,2 km². Dentro de sus límites geográficos se encuentran la parte sur de las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo y Granma.

El estudio bibliográfico mostro que a nivel internacional existen diversas metodologías para evaluar el potencial de licuefacción, tales como Seed and Idriss, 1971; Seed et al., 1983; Seed et al., 1985; Tokimatsu and Yoshimi, 1983; Seed and De Alba, 1986; Ishihara, 1985; Shibata and Teparaksa, 1988 (citados por TC4, 1999); así como los diferentes métodos desarrollados en el manual de zonación sísmica japonés, conocido como TC4 (1999), en función de los grados o nivel de estudio y la escala correspondiente.

En los últimos años estas metodologías fueron implementadas en Cuba de forma integral, parcial o combinada; esto se puede notar en los trabajos de Ordaz et al., 2013; Fernández, 2000; Márquez et al., 2002; García et al., 2002; Heredia y Calderín, 2004; Zapata et al., 2013; Chuy et al., 2015b; Fernández et al., 2016; Fernández et al., 2017. Pero existen reportes históricos de licuefacción en otras áreas de Cuba oriental que necesitan ser estudiadas.

Por otra parte, para los deslizamientos existen diferentes formas de realizar el cartografiado de la susceptibilidad a través de métodos estadísticos, heurísticos

y determinísticos (Van Westen et al., 1999; Guzzetti et al., 1999).

Las metodologías mencionadas con anterioridad, así como otras empleadas en Cuba (colectivo de autores, 2011; Castellanos, 2008; Villalón et al., 2012; Savón et al., 2017) tienen como deficiencia la falta de integración en los análisis de deslizamientos y licuefacción inducidos por terremotos ya que para los deslizamientos no integran los aspectos ingeniero-geológicos y no aplican los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa. Los criterios referidos con anterioridad hacen necesario la introducción de estos métodos.

2. MATERIAL Y MÉTODO

Para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por terremotos, se debe realizar la caracterización geológica; identificación de **factores antrópicos**; caracterización morfotectónica y evaluación sismológicas, todos estos aspectos influyen en la ocurrencia de los principales peligros geológicos inducidos. A continuación, se realiza la descripción de cada una de estos pasos.

Caracterización geológica

Se realiza la **caracterización** geológica del territorio a partir del mapa geológico digital de Cuba Oriental a escala 1:100 000 (IGP, 2003), el léxico estratigráfico (Colectivo autores, 2013) y los aspectos ingeniero-geológicos de las formaciones presentes (Pérez, 1976), como la alternancia de rocas duras y débiles, el intemperismo, tectonismo, carso, estratificación, entre otros aspectos. Como resultado se obtienen las formaciones geológicas de mayor susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos.

Factores antrópicos

Se identifican los elementos antropizados del terri-



Figura 1. Ubicación geográfica de Cuba suroriental (rectángulo rojo), con las ciudades Santiago de Cuba y Guantánamo como cabeceras de provincias. Fuente: Autores.

torio que conducen a la ocurrencia de deslizamientos y licuefacción de suelos; lo cual permite obtener la **caracterización** de los **factores antrópicos**.

Caracterización morfotectónica

La caracterización morfotectónica incluye la definición de estructuras tectónicas, el análisis geomorfológico y la reevaluación de estructuras regionales o límites de bloques morfotectónicos. A continuación, se describen cada una de estas tareas.

Definición de estructuras tectónicas

Las estructuras tectónicas se definen al aplicar los métodos morfométricos, (tabla 1). Como resultado se obtienen los esquemas homólogos a través de herramientas SIG. Luego se identifican los alineamientos y se confecciona el mapa de superposición gráfica de los mismos; finalmente, con la aplicación de criterios de identificación se obtienen las estructuras, su caracterización y esquema tectónico.

Realización del análisis geomorfológico

Para el análisis geomorfológico se emplea la clasificación morfológica del relieve (Moreno et al., 2017), y se obtienen las categorías de montañas, alturas y llanuras, así como las subcategorías asociadas. Así como los criterios de identificación del fallamiento activo.

Reevaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos

Se realiza la reevaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos a través del método de Haller et al., 1993 que clasifica las fallas como: simple falla, definida por una edad única de ruptura; con secciones, que puede o no ser de una edad o estilo estructural simple; segmentada, presenta segmentos estructurales con comportamiento sísmico propio o que actúan independientemente uno de otro. Como resultado se obtiene el fallamiento activo.

Evaluación sismológica

La evaluación sismológica incluye varias tareas como, ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional; realización de análisis de la información macrosísmica existente; obtención de las máximas aceleraciones esperadas; aplicación del Criterio Magnitud-Distancia. A continuación, se describen cada una de estas tareas:

Ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN)

Se analiza el catálogo de terremotos y se consideran

los eventos con magnitud mayor o igual a 4,0 Richter; a partir de esta magnitud se generan los deslizamientos (Keefer, 1984). Se obtienen los niveles de actividad sísmica, epicentros reportados, y principales zonas sismogeneradoras que afectan la región, así como los criterios de fallamiento activo.

Realización de análisis de la información macrosísmica existente

Se analiza la información macrosísmica y se valoran los reportes históricos de peligros geológicos inducidos por sismos. Estas zonas constituyen áreas de peligro porque bajo condiciones similares puede repetirse el fenómeno (TC4, 1999). También se obtiene la cantidad de terremotos fuertes ocurridos en la región.

Obtención de las máximas aceleraciones esperadas

Al emplear los resultados precedentes de Chuy y Álvarez, 1995; y la NC:46-1999 (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1999), se determina la zona sísmica donde se ubica el área de estudio, y se obtienen los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno e intensidad sísmica. Según Seed et al., 1985 citado por TC4 (1999), las intensidades entre VII-IX MSK y la aceleración en el rango de 0,10g – 0,40g influyen en la ocurrencia de la licuefacción.

Aplicación del Criterio Magnitud-Distancia

Este criterio establece que la proporción de fallo de taludes disminuye proporcionalmente con el aumento de la distancia de la fuente sísmica (TC4, 1999). Se obtiene la máxima distancia epicentral (figura 2) de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y la máxima distancia epicentral de fallo de taludes (Clase 2), y se considera a Cuba como un país húmedo y los terremotos históricos con peligros geológicos asociados.

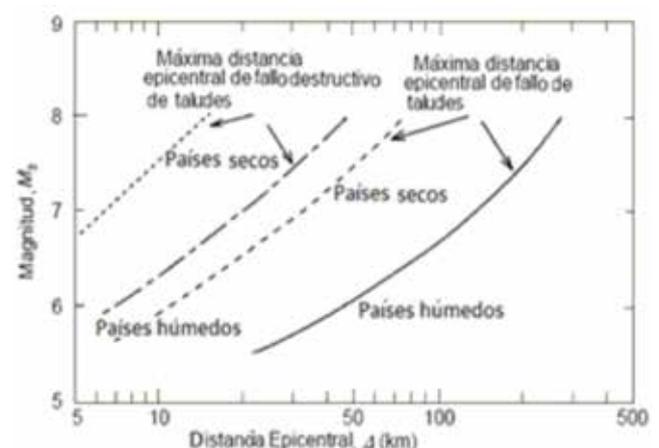


Figura 2. Relación general entre la magnitud y la distancia epicentral de fallo de taludes. Fuente TC4, (1999).

Tabla 1. Métodos morfométricos aplicados

Métodos morfométricos	Fórmulas asociadas o aplicación del método	Métodos morfométricos
Trazado de la red fluvial	Para su confección se parte del sistema de ríos y tributarios, representados en el mapa topográfico, tanto sus cauces permanentes como temporales; después se procede al trazado de todas las cárcavas y afluentes, que quedan inferidos por las curvas de nivel hasta llegar a los extremos más elevados de la red fluvial, tanto en su cabecera como en los márgenes de la cuenca (Rodríguez, 2000).	Metal 1 (Vehículo Militar)
Jerarquización de la red del drenaje	Para su elaboración los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial se subdividen en segmentos de cauce, clasificados en función del orden de magnitud de los mismos, según el método de Horton (1945).	Metal 2 (garita)
Densidad de drenaje	según Horton, 1945 se define como el cociente entre la longitud total de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca y el área total de la cuenca. Dada por la ecuación 1: $D = Lt/A \quad (1)$ <p>Donde Lt, es longitud total de todos los canales de agua en km; A, es el área en km²</p>	Metal 1 (Vehículo Militar)
Nivel base de erosión	Estos mapas marcarán los niveles de base de erosión de los ríos de un determinado orden, el cual está dado por el tiempo de su formación. Se denominan de primer orden los ríos más jóvenes o de última formación, sucesivamente serán más viejos a medida que el orden sea mayor. Después de confeccionado el mapa de órdenes, se superpone el mismo al mapa topográfico; posteriormente, se buscan los puntos de intersección de los ríos de un orden determinado con las curvas de nivel y se ponen en esos puntos los valores de la cota topográfica. Después de marcados todos los puntos, se unen con líneas rectas o curvas los puntos de igual valor (Rodríguez, 2000).	Metal 2 (garita)
Pendientes	Consiste en la representación areal de la variación de los valores de pendiente de un sector de la superficie. Para la confección del mapa se parte del criterio de que áreas con separación similar de las curvas de nivel presentan iguales valores de inclinación; por lo cual la primera tarea consiste en separar los sectores del mapa con comportamiento similar de estas curvas, determinando para cada sector los valores de pendiente que le corresponden en dependencia del espaciamento entre curvas. Según Rodríguez (2000) se determina a través de la ecuación 2: $\text{Tan } \alpha = \Delta h/e \quad (2)$ <p>Donde α es el ángulo de pendiente; Δh es el desnivel o separación vertical entre curvas; e es el espaciamento horizontal entre curvas.</p>	Metal 1 (Vehículo Militar)
Diseción vertical	Es un parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en m/km ² (Mora & Vahrson, 1993; Priego et al., 2008). Sirve principalmente para definir algunos tipos de relieve (montañas, planicies acolinadas, etc.) y ofrece datos sobre la energía del relieve. Se determina a través de la ecuación 3: $Dv = H_{\text{max}} - H_{\text{min}}/A \quad (3)$ <p>Donde Dv, es la diseción vertical; H_{máx} es la altura máxima en metros; H_{mín} es la altura mínima en metros; A, es el área en kilómetros cuadrados (km²).</p>	Metal 2 (garita)

Luego de obtener la caracterización geológica, antrópica, morfotectónica y la evaluación sismológica del territorio, se evalúan la licuefacción de suelos y los deslizamientos inducidos por terremotos, como se describe a continuación:

2.2. Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos inducida por terremotos

Para la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos se emplean los criterios geológico-geomorfológico y si/no se caracterizan los suelos a licuar.

Criterio geológico-geomorfológico

Para evaluar la licuefacción se emplea el criterio geológico-geomorfológico que depende de la información existente y se seleccionan las unidades geomorfológicas (tabla 2) y geológicas susceptibles en función de su edad (tabla 3). Asimismo, se determinan las condiciones geomorfológicas específicas (tabla 4) para la ocurrencia de este peligro (TC4, 1999). Se valoran los suelos susceptibles y en el caso de los sedimentos aluviales se valora su granulometría (Peñalver et al., 2008) y perfil de suelo (NC:46-99).

Tabla 2. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción, Grado I. Fuente: Iwasaki et al., 1982 (citados por TC4, 1999)

Categoría	Topografía	Potencial de licuefacción
A	Actual cauce del río, viejo cauce del río, pantano, tierras reclamadas, tierras bajas.	Probable licuefacción
B	Abanico, arenas de dunas, llanura de inundación, playas y otras llanuras.	Posible licuefacción
C	Terrazas marinas, colinas y montañas.	No probable licuefacción

Tabla 3. Unidades geológicas (resumidas) susceptibles a la licuefacción durante una fuerte sacudida. Fuente: Youd and Perkins, 1978 (citados por TC4, 1999).

Tipos de depósitos	Probabilidad de que los sedimentos cohesivos, saturados, sean susceptibles a la licuefacción por la edad del depósito			
	< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Prepleistoceno
Canal del río	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Llanura de inundación	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Abanico y llanura aluvial	-----	Baja	Muy baja	Muy baja
Terrazas marinas	Moderada	Baja	Baja	Muy baja
Coluviales	Alta	Moderada	Baja	Muy baja

Tabla 4. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción sometidas a una sacudida de VIII grados M.M (Merciali Modificada). Fuente: Wakamatsu, 1992 (citado por TC4, 1999).

Condiciones geomorfológicas		Potencial de licuefacción
Clasificación	Condiciones específicas	No probable
Llanura del valle	Llanura del valle que contiene grava o adoquines	Posible
	Llanura del valle que contiene suelos arenosos	Posible
Pantano y ciénagas	-----	Probable
Canal de río abandonado	-----	Probable
Antiguo estanque	-----	No Probable
Canal de río seco	Canal de río seco que contiene grava o adoquines	Probable
	Canal de río seco que contiene suelos arenosos	Muy baja

Se consideraron, además, la intensidad sísmica; la aceleración horizontal según ubicación del área de estudio y NC46:1999 (para las zonas 2A con 0,15 g, 2B con 0,20 g y 3 con 0,30 g); la topografía (TC4, 1999); así como la profundidad de los niveles freáticos según González de Vallejo et al., 2002.

El método aplicado pertenece al Nivel o Grado I de zonación sísmica (TC4, 1999) debido a la carencia de información ingeniero-geológica (límite líquido, índice de plasticidad, profundidad del nivel freático) en las

calas reanalizadas (Méndez et al., 2003) para el sector Santiago de Cuba en Cuba suroriental; así como la falta de información requerida sobre los mapas de suelos cuaternarios a escala 1:250 000 (IGP, 2008) y la existencia de información a escalas pequeñas.

Criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar

Otra forma para evaluar la licuefacción de suelos es a través del criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar, según Pierre-Yves (2005), son susceptibles a licuar.

Cieno y arenas que presenten las siguientes características:

Grado de saturación al 100 %; granulometría uniforme con tamaño del grano al 50 %, (D_{50}), en el intervalo de 0,05 mm y 1,5 mm.

Arcillas que presenten las siguientes características:

Tamaño del grano al 15 %, (D_{15}) mayor que 0,005 mm; límite líquido menor que 35 %; contenido de agua mayor que $0,90W_L$; índice de plasticidad menor que 0,73 ($W_p - 20$).

No son susceptibles a licuar en ningún caso:

Gravas con D_{10} mayor que 2 mm.

Arcillas que presenten las siguientes características:

Tamaño del grano al 70 %, (D_{70}) menor que 74 μ m; índice de plasticidad mayor que 10 %.

Para la aplicación de este criterio se consultaron la base de calas disponible (Méndez et al., 2003). Como resultado se obtienen los suelos susceptibles a la licuefacción.

2.3 Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por terremotos

En la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos se emplea el método de la zonación pasiva que se obtiene combinando las variables condicionantes, ya que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, con determinadas litologías, con cierto grado de humedad y pendiente específicas, se alcanza un grado de susceptibilidad. Esos elementos son los denominados elementos pasivos (Mora et al., 1992).

En correspondencia con estos criterios, se realizaron las siguientes modificaciones: en la susceptibilidad litológica se incluyen los aspectos ingeniero-geológicos y las características de los grupos litoestructurales (Nicholson y Hencher, 1997). Además, se sustituye la susceptibilidad por humedad de suelo por la densidad de la red hidrográfica, según los criterios de Aristizábal y Yokota, 2006; Flores y Hernández, 2012; Vargas, 2002 y Castellanos, 2008. En la figura 3 se muestran las variables condicionantes que conforman la zonación pasiva.

Geomorfología. Se consideran las zonas rocosas o acantilados de fuertes pendientes según los criterios de la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales (COSUDE/ALARN, 2006). Igualmente, se consideran la topografía y la forma del relieve (Galbán et al., 2012; Galbán, 2014). Los valores de las pendientes se generan a partir del MDT para obtener la susceptibilidad geomorfológica.

Geología y Geotecnia. Se valoran los afloramientos rocosos fuertemente fracturados (COSUDE/ALARN, 2006; Flores, 2003); rocas alteradas, intemperizadas; presencia de estratificación, carsificación, agrietamiento, tectonismo y plegamientos (Pérez, 1976); información geológica (IGP, 2003; Colectivo de autores, 2013) y elementos litológicos (alternancia de estratos de diferente naturaleza). Además, se clasifican las rocas, duras, duras a semiduras, friables incoherentes y blandas coherentes (Lomtadze, 1977 y Abramson, 1996) y sus propiedades físico-mecánicas; los grupos litoestructurales y su susceptibilidad.

Hidrología. La red del drenaje, los efectos del agua

Tabla 5. Propuesta de clasificación de la zonación pasiva.

Clasificación	Pendientes	S. litológica	Relieve	Relieve	Resultados a esperar
Alta	Mayores de 45° y de 35°-45°	Alta	Montañas con elevaciones de más 500 m y entre 200 y 500 m sobre nivel medio del mar	Muy densa y densa	Caidas desprendimientos desplomes, volcamientos, deslizamientos
Moderada	25° -35°	Moderada	Zonas elevadas entre 50 y 200 m de altura	Moderadamente densa	Deslizamientos
Baja	15° -25°	Baja	Zonas bajas, llanuras o elevaciones bajas de hasta 50 m de altura	Baja densidad	Baja ocurrencia de deslizamientos
Muy baja	0° -15°	Baja	Zonas bajas	Baja densidad	No ocurren deslizamientos

Nota: En la tabla 5., S. litológica representa la susceptibilidad litológica.

en el terreno, los arrastres, la erosión de los materiales que integran el talud o la ladera, la circulación subsuperficial de agua, los cambios en el nivel de base en la escorrentía y las variaciones del nivel freático, entre otros elementos (González de Vallejo et al., 2002). Igualmente, la densidad de la red y los primeros órdenes de los ríos que indican áreas de erosión.

Se resalta la aplicación de métodos y técnicas experimentales (laboratorio y campo) en el área de investigación. Como parte de este proceso se crea el inventario de deslizamientos (Villalón et al., 2012; Rosabal et al., 2009; Rosabal, 2012 y 2013) relacionado con las intensas lluvias, debido a que no existe un inventario de deslizamientos por sismos para Cuba.

Apoyados en herramienta del SIG, se digitalizan y confeccionan los mapas que dependen del MDT, se georreferencia la información y se realiza la generalización cartográfica de los mapas bajo análisis. Cada variable condicionante es tratada individualmente en el SIG mediante clasificaciones, creándose 4 clases para generar los mapas que expresan su aporte a la susceptibilidad. Se consideraron los criterios de evaluación del peligro por derrumbe (COSUDE/ALARN, 2006). Como resultado se obtiene el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos con cuatro niveles de susceptibilidad, como se muestra en la tabla 5. El mapa obtenido necesita ser validado, para ello se realiza la comprobación directa.

Comprobación directa

La comprobación directa en el terreno permite verificar en el campo el comportamiento del modelo obtenido y prever deslizamientos futuros. Se emplean además los inventarios y resultados de investigaciones precedentes. Se obtiene la documentación de deslizamientos, caídas y desprendimientos de rocas.

Al culminar el último paso de la metodología se obtiene la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos y a los deslizamientos inducidos por actividad sísmica, que contará con las máximas distancias epicentrales de fallo destructivos de taludes y fallo de taludes; lo cual permitirá una mejor estimación de la peligrosidad a los deslizamientos y a la licuefacción. Este resultado es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, principalmente en la primera etapa de planificación de un proyecto constructivo.

En la figura 3, 3a y 3b, se muestra el diseño del flujograma que contiene la aplicación de los métodos empleados para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por terremotos.

3. RESULTADOS

*Ver en la página siguiente (Pág. 20).

4. CONCLUSIONES

La metodología que agrupa los métodos morfométricos, conjuntamente con la evaluación sísmológica y la tectónica activa, permite la caracterización y cartografiado del fallamiento activo; la caracterización morfotectónica a escala detallada y aporta criterios válidos para la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica, así como la comprobación directa en el terreno de los deslizamientos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigaciones Sísmológicas (CENAI) y al Dr. Tomás Jacinto Chuy Rodríguez, por su ayuda incondicional.

REFERENCIAS

- Abramson, L. (1996). Slope stability and stabilization methods. *Engineering geology Principles*. Wiley Interscience. pp. 60-106.
- Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/ Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales (COSUDE/ALARN). (2006). *Proyecto ALARN. Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales. Guía para el especialista*. Recuperado de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Abril2006/CD1/pdf/spa/doc14894/doc14894-2c3.pdf>
- Aristizábal, E. y Yokota, Sh. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*, 73(149).
- Castellanos, E. (2008). *Evaluación multiescala de riesgo por deslizamientos de terreno en Cuba* (Tesis doctoral). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.
- Colectivo de autores. (2011). *Estudios de peligros, vulnerabilidad y riesgos de deslizamientos de tierra* [Informe final]. Holguín.
- Colectivo de autores. (2013). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana. Instituto de Geología y Paleontología. Servicio Geológico de Cuba. Ministerio de Energía y Minas.

* RESULTADOS

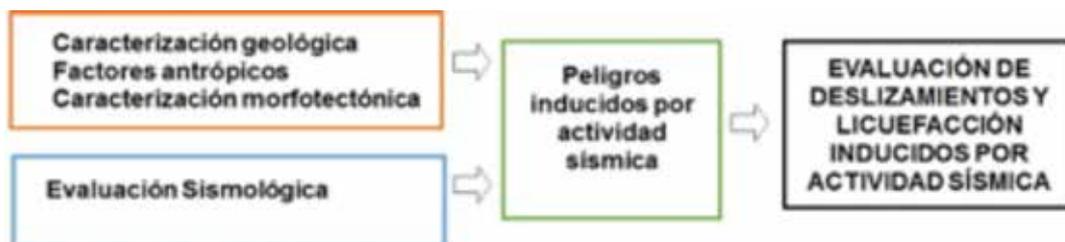


Figura 3. Flujograma general de la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

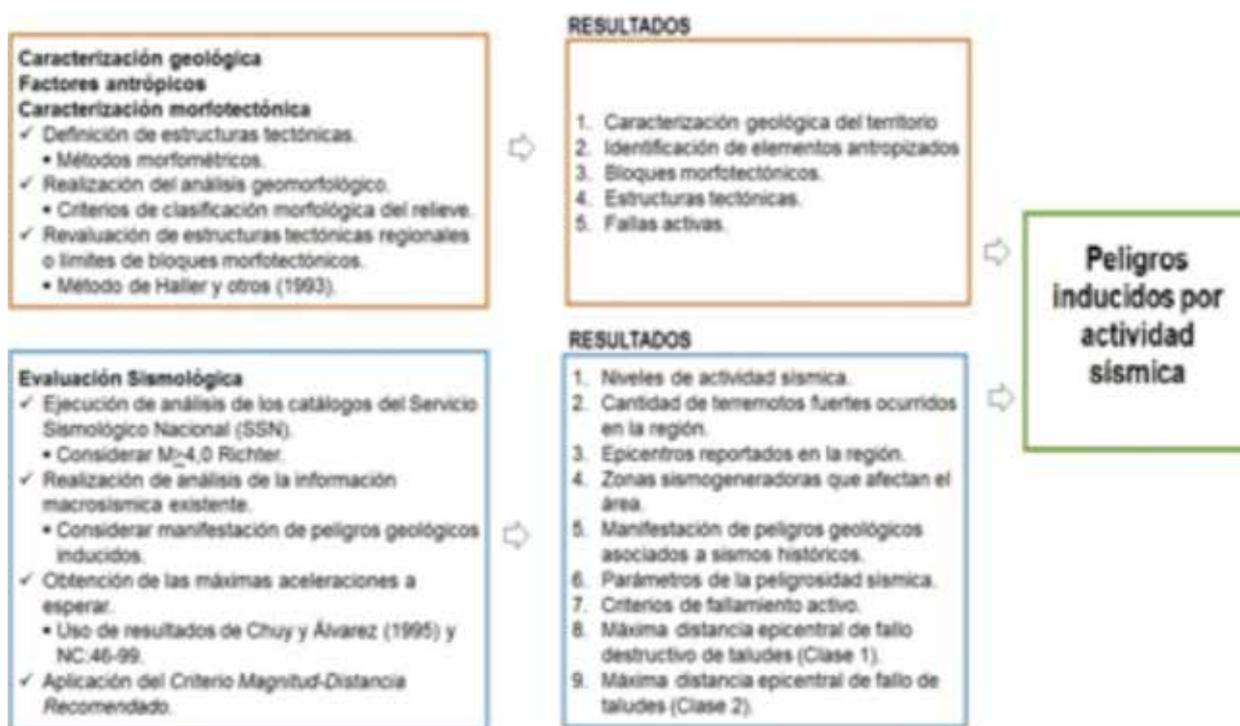


Figura 3a. Representación esquemática detallada del flujograma que muestra la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

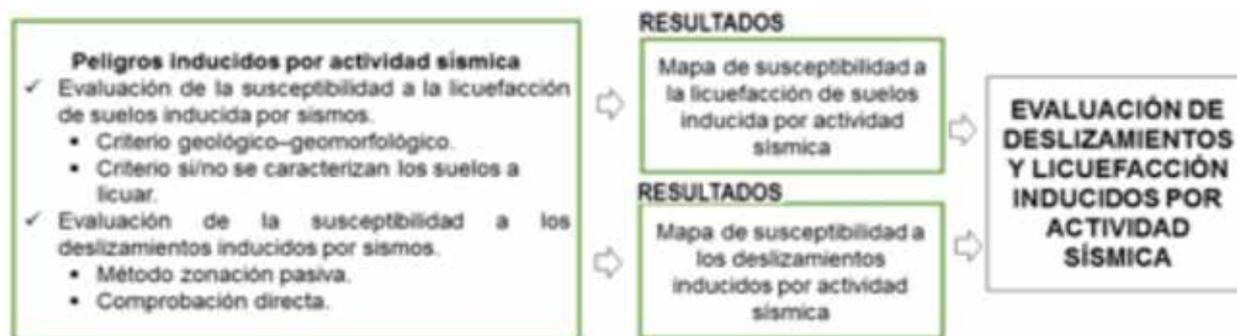


Figura 3b. Representación esquemática del flujograma en detalle. Fuente: Autora.

Chuy, T. y Álvarez, J. (1995). *Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana* [Reporte de Investigación]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

Chuy, T., Rosabal, S., Caballero, F. y Oñate, R. (2015b). *Evaluación de la sismicidad y peligro sísmico para la inversión Terminal Multipropósito del Puerto de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de

- Investigaciones Sismológicas (Cenais) y Puerto Guillerme Moncada]. Santiago de Cuba
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización (1999). *Norma Cubana NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción*. La Habana.
- Fernández, B. (2000). *Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes* (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
- Fernández, L., Guardado, R., Herrera, I., Oliva, R. y Díaz, P. (2016). Escenarios susceptibles a licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Revista Minería y Geología*, 32(2), 53-69.
- Fernández, L., Bandera, I., Guardado, R. y Oliva, R. (2017). Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. *Revista Minería y Geología*, 33(1), 26-43.
- Flores, M. (2003). *Movimientos en masa: identificación, causas y alternativas de manejo en Medellín*. Medellín: Editorial Alcaldía.
- Flores, M. y Hernández, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27 F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista Geografía Norte Grande*, 53, 57-74.
- Galbán, L., Chuy, T. y Vidaud, I. (2012). *Indicadores más comunes en la evaluación de riesgos geológicos. Indicadores cualitativos y cuantitativos para la evaluación de peligro, vulnerabilidad y riesgos geológicos*. España: Editorial Académica Española.
- Galbán, L. (2014). *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba* (Tesis doctoral). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
- García, J., Zapata, J. A., Arango, E. D., Monnar, O., Chuy, T. J., Fernández, B. C., Reyes, C. R., Oliva, R. (2002). Manejo y evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba, a partir de su implementación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). *Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba*. La Habana, Cuba. Editorial Academia. pp 73 – 82
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Haller, K., Machette, M. & Dart, R. (1993). *Guidelines for US database and map for the maps of the major active faults, Western Hemisphere, International Lithosphere Program (ILP), Project II-2*. Denver, Colorado, USA: US Department of Interior, US Geological Survey.
- Heredia, N. y Calderín, F. (2004). El Fenómeno de Licuefacción en suelos de la ciudad de Santiago de Cuba. En *Memorias de I Conferencia Internacional Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica SISMOS 2004*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-276.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2003). *Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2008). *Mapa geológico digital del Cuaternario a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología, Ministerio de la Industria Básica (Minbas).
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Survey of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Lomtadze, V. (1977). *Geología aplicada a la ingeniería geodinámica aplicada a la ingeniería*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Márquez, I., Seisdedos, J., Chuy, T. y Díaz, R. (2002). *Valoración de las amenazas naturales y problemas estructurales que presentan dos instalaciones de la empresa Retomed en la ciudad de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)] Santiago de Cuba.
- Méndez, I., Aguller, M., Guevara, T., Rodríguez, M., Ramírez, M., Llull, E. y Recouso, Y. (2003). *Confección base de datos de pozos de perforación de Cuba Oriental* [Informe]. Santiago de Cuba: Ministerio de la Industria Básica, Empresa Geominera Oriente.
- Mora, R., Vahrson, W. y Mora, S. (1992). *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central. *Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central*. (CEPREDENAC).
- Mora, S. & Vahrson, W. (1993). *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*, Bull. Intl. Ass. Eng. Geology.
- Moreno, Y., Labrada, A., Rodríguez, A., Figueroa, Y. (2017). Metodología para la confección del mapa geomorfológico de la república de Cuba a escala 1:100 000. Guía para su elaboración. (Geocuba, ISMM, IGP).
- Nicholson, D. T. & Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. In *Proceeding International Symposium on Engineering Geology and the environment* (pp. 911-917). Athens.

- Ordaz, A., Hernández, J., Chuy, T. y García, J. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería & Geología, Revista de Ciencias de la Tierra*, 29(2), 1-15.
- Peñalver, L., Cabrera, M., Delgado, R., Rodríguez, L., Pantaleón, G., Ugalde, C., Pérez, C. y Denis, R. (2008). *Mapa Digital de los Depósitos Cuaternarios del Archipiélago Cubano a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Pérez, N. (1976). Aspectos ingeniero-geológicos de Cuba Oriental. En texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente....(Manuscrito). La Habana. Archivo del. Instituto de. Geología y. Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba.
- Pierre-Yves, Bard. (2005). *Local effects on strong ground motion: physical basis and estimation methods in view of microzoning studies. Seismology, Seismic data analysis, hazard assessment and risk mitigation International Training Course*. Postdam, Germany.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generalización semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y Métodos*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez, A. (2000). *Geomorfología*. Moa, Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Rosabal, S., Zapata, J. y Gómez, J. (2009). Incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba. *Revista GEOS. Unión Geofísica Mexicana*, 29(2), 1-12.
- Rosabal, S. (2012). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la Provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de V Taller internacional de ingeniería y arquitectura para la reducción de desastres (CIIARD). 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana.
- Rosabal, S. (2013). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de IV Simposio de riesgos geológicos y sismicidad. X Congreso Cubano de Geología (Geología 2013)*. La Habana, Cuba.
- Savón, Y., Mesa, A., Matos, L., Castillo, L., Odilio, M. y Delgado, R. (2017). Las precipitaciones como elemento disparador de movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo. En *Memorias de XII Congreso de Geología. VI Simposio de riesgos geológicos, procesos costeros. VII Convención de Ciencias de la Tierra*. La Habana, Cuba.
- Technical committee for earthquake geotechnical engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). (1999). *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. Tokyo, Japan: The Japanese Geotechnical Society.
- Van Westen, C, Seijmonsbergen, A. & Mantovani, F. (1999). Comparing landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 20(2-3), 137-158.
- Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos municipio de La Celia. Departamento de Risaralda. Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). Pereira, *Risaralda-CARDER-Feb. 2002*
- Villalón, M., Reyes, C., Aguller, C., Trejo, R., Nápoles, S., Despaigne, G.,... Suarez, O. (2012). *Informe sobre los estudios de PVR deslizamientos provincia Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
- Zapata, J., Rosabal, S. y Cutie, M. (2013). *Investigaciones sismológicas para proyecto de estabilidad de taludes de la presa de cola de la empresa de níquel Ernesto Che Guevara en Moa, Holguín*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

Sobre los autores

Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez

Ingeniera Geóloga, Máster en Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) y Doctora en Ciencias Geológicas. Autora de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigadora Auxiliar en el Grupo de Peligro Sísmico del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba.

Alina Rodríguez Infante

Ingeniera Geóloga y Doctora en Ciencias Geológicas. Autora de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigadora Titular en el Departamento de Geología del Instituto Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.

José A. Zapata Balanqué

Ingeniero Geofísico y Doctora en Ciencias Técnicas. Autor de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigador Titular en Delegación Provincial del CITMA, en Santiago de Cuba (CITMA). Cuba.